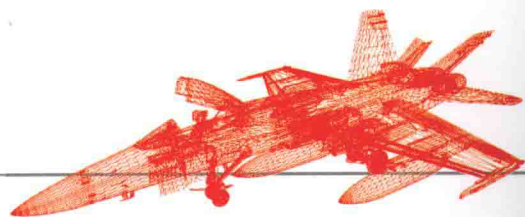


高等学校教材·航空、航天、航海系列
TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

机载探测与电子对抗原理

主编 符小卫 陈 军
编者 符小卫 陈 军
高晓光 李 波



西北工业大学出版社

机载探测与电子对抗原理

主编 符小卫 陈 军
编者 符小卫 陈 军
高晓光 李 波

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书从系统工程的角度完整地阐述了作战飞机及机载武器的雷达、光电、制导系统、电子对抗系统探测与对抗的原理。本书分8章:第1章主要介绍机载雷达系统工作原理;第2章介绍机载光电系统原理;第3章介绍空空导弹红外导引系统工作原理;第4章介绍空空导弹雷达导引系统原理;第5章介绍电子对抗的基本概念;第6章介绍电子侦察原理;第7章介绍电子攻击原理;第8章介绍电子防护原理。

在编写上,本书采用了原理与某些工程实践相结合的方法,力求使学生对飞机及机载武器有源探测、无源探测以及电子对抗系统有较系统、全面的认识。

本书可作为探测制导与控制技术专业本科生教材,参考教学时数为40~60学时。

图书在版编目(CIP)数据

机载探测与电子对抗原理/符小卫,陈军主编. —西安:西北工业大学出版社,2013.12
ISBN 978-7-5612-3877-6

I. ①机… II. ①符… ②陈… III. ①机载电子对抗系统 IV. ①TN97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 315293 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:14.5

字数:353千字

版次:2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷

定价:29.00元



前 言

战斗机主要依靠机载雷达发现目标,现代化机载雷达能全天候使用,不仅探测距离远,而且具备多目标发现、识别、跟踪和攻击的能力。但由于雷达采用有源探测方式,工作时需要主动发射电磁波,所以易被敌方发现和干扰。特别是随着现代科技的不断发展,飞机隐身技术和电子对抗技术的进步,使得机载雷达的探测距离急剧下降,本身隐蔽性差、抗干扰能力弱的缺点也越来越明显地暴露出来。同时,随着科技的进步,为了对抗雷达而发展的新武器和新战术也层出不穷,例如对雷达实施压制或欺骗的电子干扰,可对雷达进行直接攻击的反辐射导弹等。因此,亟须要研制一种新型的探测设备,在正常情况下可辅助雷达工作。

机载红外搜索跟踪系统是利用目标与背景之间的温差形成热点或图像来探测、跟踪目标的光电系统,是机载武器火控系统的一个重要组成部分。系统本身既能独立对目标进行探测和跟踪,为武器火控系统提供精确的目标方位,也可与雷达互相随动执行对目标的搜索和跟踪。机载红外搜索跟踪系统适用于空域监视、威胁判断、抗电子干扰、对空导弹探测、自动搜索和跟踪目标等作战任务。与其他机载电子设备配合使用可大大提高飞机在全波段、全天候、多方位、大纵深环境下的作战生存能力。

随着各种高新技术的不断发展,在现代战争中,机载雷达与目标直接的对抗也就变得越来越激烈了。电子对抗的目的是在作战中获取战场上的电磁优势和信息优势,追求制电磁权和制信息权,从而引导战斗取得胜利。从目标方面来讲,千方百计地削弱雷达的效能乃至使其完全丧失作用,是电子战中电子干扰的根本目的。在雷达方面,为了有效地对付各种电子干扰,就必须考虑相应的电子反对抗措施。雷达与电子对抗的斗争,直接关系到雷达和目标的生存与否。

本书由符小卫、陈军主编。第1~3章由符小卫编写;第4章由符小卫、高晓光编写;第5章由陈军、李波编写;第6~8章由陈军编写。

本书在编写上采用了原理与某些工程实践相结合的方法,力求使本科生对飞机及机载武器有源探测、无源探测以及电子对抗系统有较系统、全面的认识。

由于水平有限,书中的错误和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2013年5月

目 录

第 1 章 机载雷达原理	1
1.1 雷达的基本概念	1
1.2 雷达的基本原理.....	10
1.3 雷达的作用距离.....	17
1.4 目标距离测量.....	28
1.5 目标角度测量.....	37
1.6 目标速度测量.....	44
第 2 章 机载光电系统	54
2.1 目标红外辐射探测原理.....	54
2.2 激光测距原理.....	56
2.3 机载红外搜索跟踪系统.....	62
2.4 前视红外/激光瞄准吊舱	67
第 3 章 空空导弹红外导引系统	76
3.1 空空导弹武器系统.....	76
3.2 红外技术在空空导弹上的应用.....	78
3.3 导弹导引系统的组成及工作原理.....	81
3.4 红外导引头光学系统的基本原理.....	83
3.5 红外探测器.....	87
3.6 光学调制与调制盘.....	91
3.7 红外制导技术的未来.....	94
第 4 章 空空导弹雷达导引系统	97
4.1 空空导弹雷达导引系统概述.....	97
4.2 空空半主动雷达制导	100
4.3 雷达导引头技术的发展趋势	102
第 5 章 电子对抗概述	104
5.1 电子对抗的定义及分类	104
5.2 电子对抗的发展历史	108
5.3 航空电子对抗的概念及其在战争中的地位和作用	115
5.4 电子对抗信号环境及其特点	117

5.5	电子对抗作战效能评估简介	117
5.6	电子对抗的发展前景	119
第 6 章	电子侦察	121
6.1	概述	121
6.2	侦察作用距离	131
6.3	对雷达频率的测量原理	139
6.4	对雷达方向的测量原理	143
6.5	对雷达定位的方法和原理	145
第 7 章	电子攻击	153
7.1	引言	153
7.2	干扰方程及有效干扰空间	155
7.3	对雷达的有源干扰	163
7.4	雷达无源干扰	177
7.5	对雷达的杀伤性压制	190
7.6	对雷达的隐身技术	201
第 8 章	电子防护	211
8.1	雷达面临的电子战威胁	211
8.2	雷达抗干扰技术	212
8.3	雷达反侦察与抗摧毁技术	216
8.4	雷达反隐身技术	224
参考文献	226

第 1 章 机载雷达原理

盲人通过手杖不断地轻叩人行道就可以沿着繁忙的街道行走,并可与其右侧建筑物的墙体保持一定的距离,也能与左侧的路边和呼啸而过的车辆之间保持一定的距离。蝙蝠通过发射一连串尖锐的鸣叫,就可以灵巧地避开行进路途上的障碍物并准确地追踪那些成为其口中美餐的昼伏夜行的小昆虫群落。与盲人和蝙蝠一样,驾驶超音速歼击机的飞行员可以准确地逼近那些远在 150 km 以外且隐藏在云层中可能入侵的敌机。他们是怎样做到这一点呢?

其实上述的每一种非凡的本领后面所蕴含的原理却非常简单,即利用物体的回波来探测物体的存在与物体之间的距离。这些现象之间的主要差别在于:盲人与蝙蝠使用的回波是声波,而在歼击机中,其雷达使用的回波是无线电波(见图 1.1)。

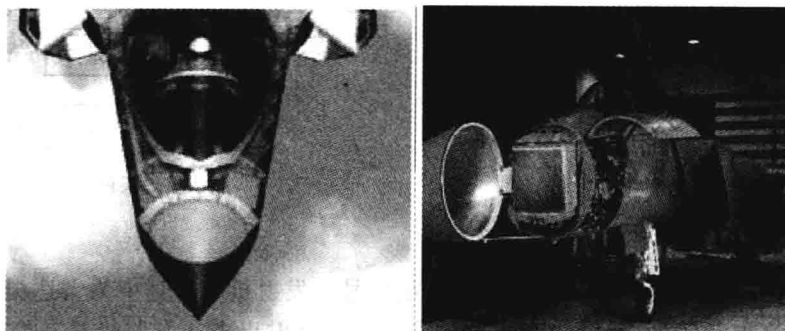


图 1.1 超声速歼击机的机头流线型前端有一部雷达,可使飞行员跟踪远在 150 km 以外的目标

1.1 雷达的基本概念

1.1.1 雷达的定义

(1) 雷达(英文 Radar, 是 Radio Detection and Ranging 的缩写, 原意是“无线电探测和距离测量”)是通过无线电技术对目标的探测和定位。

(2) 无线电探测。诸如飞机、舰船、车辆、建筑物、地貌等许多物体都可以反射无线电波, 这与它们对光的反射很像。事实上, 无线电波和光一样, 都是电磁能量的流动, 唯一的差异是光的频率要高得多。反射的能量是在各个方向上散射的, 但是其可探测部分的散射能量从其原先入射方向散射回去。在舰船和地基雷达所用的长波(频率较低)段, 大气几乎是完全透明的。对于大多数机载雷达所用的短波段也几乎是同样的。因此, 通过探测反射的无线电波, 就可以不分昼夜地“看见”物体, 甚至可透过阴霾、尘雾和烟云“看见”物体。

(3) 雷达以辐射电磁能量并检测反射体(目标)反射的回波的方式工作。回波信号的特性可以提供有关目标的信息。通过测量辐射能量传播到目标并返回的时间可得到雷达与目标之

间的距离。目标的方位通过方向性天线(具有窄波束的天线)测量回波信号的到达角来确定。对于动目标,雷达通过多普勒效应探测出运动的速度并能推导出目标的运动轨迹或航迹,并能预测它未来的位置。雷达可在距离上、角度上或这两方面都获得分辨率。

(4)“雷达”出现于第二次世界大战中,是名副其实的“千里眼”。随着各部分参数性能的提高(例如,波束方向性、接收机灵敏度、发射机相参性等),雷达已经成为人类探测不同性质目标的强大工具。现在的雷达除了探测和定位飞机外,在军事、气象、交通、航空、遥感遥测、勘探等领域也发挥着重大作用。

1.1.2 雷达的基本组成部分

从雷达的最基本形式上讲,一部雷达由5部分组成:一部发射机、一部对发射频率调谐的接收机、两副天线和一台显示器(见图1.2)。为了探测物体的存在,发射机产生无线电波并由两副天线中的一副天线来进行辐射。同时,接收机接收无线电波的回波,回波用另一副天线检测。如果探测到一个目标,出现在显示屏上的光点就指示目标的位置。

在实际设计中,发射机与接收机通常共用一副天线,如图1.3所示。

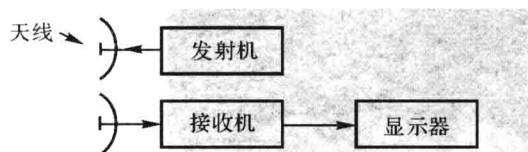


图 1.2 雷达基本组成

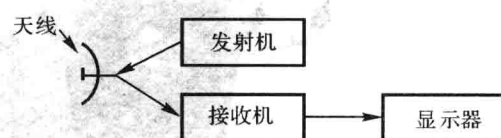


图 1.3 实际应用中的雷达

1. 发射机

雷达工作时要求发射特定的大功率无线电信号。发射机在雷达中为雷达提供一个载波受到调制的大功率射频信号,经馈线和收发开关由天线辐射出去。发射机是一个大功率的振荡器,通常是磁控管,如图1.4所示。

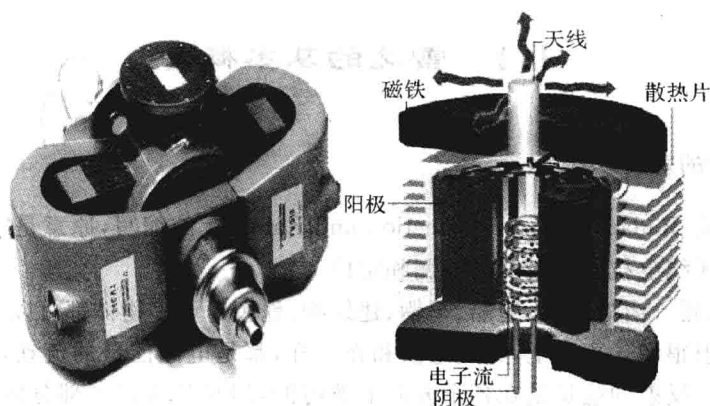


图 1.4 磁控管

(1)磁控管。磁控管是一种特殊的真空二极管,同时又是一个完整的振荡器,只要供给适当的电源电压及灯丝电压,就可以产生所需的高功率微波振荡,因此又称磁控管振荡器。磁控管主要由阴极、阳极、磁路和调谐装置等部件构成,剖面图如图1.5所示。

(2)磁控管的构造。

- 1)真空二极管；
- 2)永久磁铁；
- 3)阳极散热片、波导输出装置、灯丝接头；

4)金属阳极形成了密封的真空空间，内部安装着它的阴极部分，阴极与阳极均为圆柱形，两者同轴安装(同轴磁控管)。

(3)磁控管的工作过程。

1)灯丝通电后阴极被加热，使其可以发射电子。同时，安装在阴极外面的永磁体会产生一个强磁场，磁场方向和电极的轴向正交。从阴极发出的电子一方面受到电场力的作用向阳极运动，一方面又受到磁场力的作用向右偏转。因此，电子在作用空间作摆线运动。

2)当电子飞近开口左侧时，会感应出正电荷，继续飞越开口，吸引正电荷沿腔壁向右运动，形成电流，相当于由电感向电容充电。磁控管中电子的运动如图 1.6 所示。

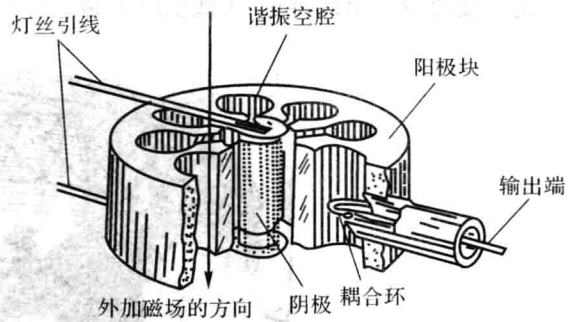


图 1.5 磁控管的剖面图

1)灯丝通电后阴极被加热，使其可以

发射电子。同时，安装在阴极外面的永磁体会产生一个强磁场，磁场方向和电极的轴向正交。从阴极发出的电子一方面受到电场力的作用向阳极运动，一方面又受到磁场力的作用向右偏转。因此，电子在作用空间作摆线运动。

2)当电子飞近开口左侧时，会感应出正电荷，继续飞越开口，吸引正电荷沿腔壁向右运动，形成电流，相当于由电感向电容充电。磁控管中电子的运动如图 1.6 所示。

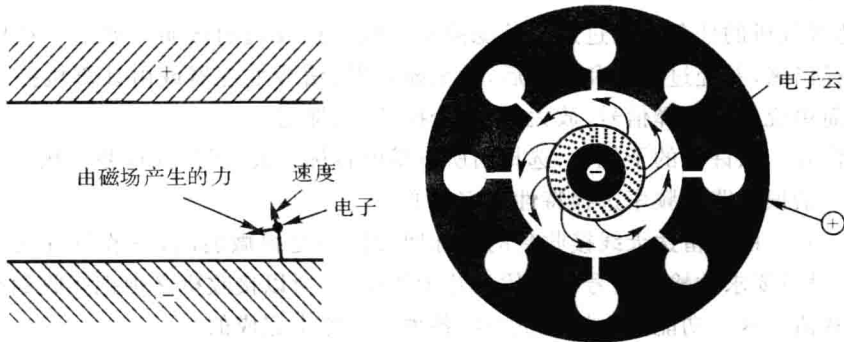


图 1.6 磁控管中电子的运动

3)当电子继续向前运动时，此时原来的开口的电荷性质发生变化，形成电容通过电感的反向放电。如此反复，形成空腔中的高频振荡(见图 1.7)。

4)与在瓶口吹气，将在瓶中产生声波非常相似，电子通过谐振腔的开口就导致振荡电磁场(无线电波)的产生。与声波的产生一样，所产生的无线电波的频率就是谐振腔的谐振频率。值得注意的是，此时的振荡很弱，若不及时补充能量，振荡将停止。

2. 天线

(1)天线分为发射天线和接收天线，作用是辐射或接收电磁波，或者定向发射或接收电磁波。对于发射天线，它来自发射机的高频电振荡能量转换为向自由空间辐射的“自由”电磁波。反之，接收天线则将在空间“自由”传播的电磁波转换为高频电振荡能量，经

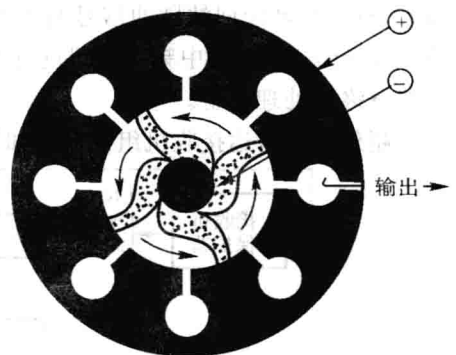


图 1.7 磁控管振荡产生

馈线送至接收机。由此可见,天线实际上是一个能量转换装置(见图 1.8)。

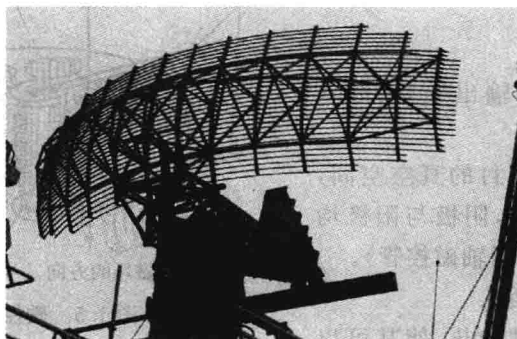


图 1.8 雷达天线

(2)为获取目标的角信息或为了集中辐射能量获得较大的探测距离,必须具有很强的方向性。大多数雷达天线所特有的定向窄波束不仅能将能量集中到目标上,而且能测量目标的方位。天线波束宽度的典型值约为 1° 或 2° 。

3. 雷达接收机

(1)雷达接收机的任务。通过适当的滤波将天线上接收到的微弱高频信号从伴随的噪声和干扰中选择出来,并经过放大和检波后,送至显示器、信号处理器或由计算机控制的雷达终端设备中。简单说就是选择信号、放大信号、变换信号、抑制干扰。

1)选择信号。从许多的干扰中,选择出所需要的目标回波信号,并抑制干扰。这一功能是利用接收机中谐振回路的频率选择特性来完成的。

2)放大信号。由于雷达天线接收到的目标回波信号是很微弱的,一般只有几微伏或十几微伏,而终端设备要求的输入信号在几伏到几十伏以上,所以接收机必须把接收到的微弱信号放大到所需数值。这一功能是由接收机中的各种放大器来完成的。

3)变换信号。雷达天线所接收到的回波信号是脉冲调制的高频信号,而后续终端设备要求输入是视频脉冲。因此,接收机采用变频器将高频脉冲变换为中频脉冲,采用检波器提取中频脉冲信号的包络,从而得到视频脉冲信号。

(2)接收机工作过程。天线接收的调频回波信号→收发开关→接收机保护器→低噪高频放大→混频(高频回波脉冲信号与本振的等幅高频电压混频,得到中频信号 IF(Intermediate Frequency))→多级中频放大器进行放大和匹配滤波获得最大的输出 SNR→检波器→视频放大器→终端处理设备。

超外差式雷达接收机组成框图如图 1.9 所示。

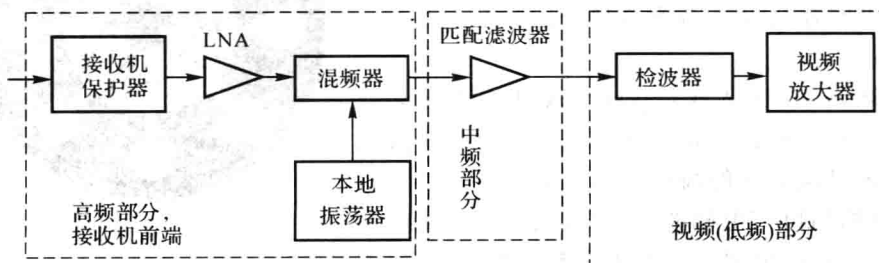


图 1.9 超外差式雷达接收机组成框图

超外差式雷达接收机具有灵敏度高、增益高、选择性好和适用性广等优点,在所有的雷达系统中都获得了实际应用。

1.1.3 基本原理

(1)为了避免发射对接收的干扰,雷达通常以脉冲形式发射无线电波,在两个脉冲间接收回波。发射脉冲的速率称为重复频率(PRF)。由于天线可以将能量聚集在一个窄波束中,所以雷达可以区分来自不同方位的目标,并能探测到很远距离的目标(见图 1.10)。

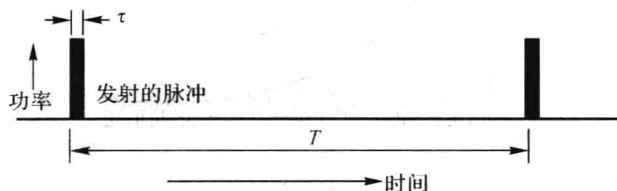


图 1.10 雷达发射的脉冲

(2)为了找到目标,波束在目标可能出现的区域系统地扫描。波束的路径称为搜索扫描图,扫描所覆盖的区域称为扫描量或扫描帧。波束扫描一帧所用的时间称为帧周期,如图 1.11 所示。

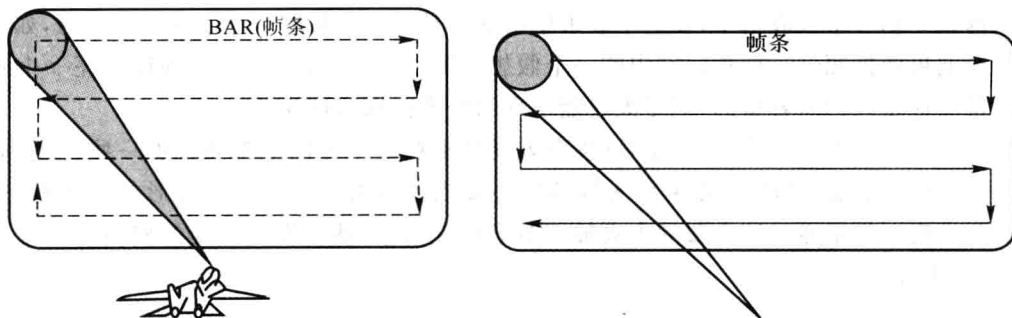


图 1.11 战斗机运用的典型搜索扫描图(扫描的条数和帧的宽度及位置可由操作员控制)

(3)与光一样,大多数机载雷达所用频率的无线电波本质上以直线方式传播。因此,雷达要收到从目标的回波,目标必须在直线距离内,如图 1.12 所示。

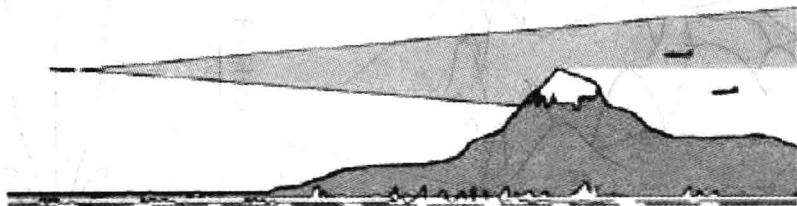


图 1.12 目标必须在直线距离内

即便如此,要探测到某一个物体,还要求物体的回波足够强,要高出接收机输出端的背景电子噪声并可辨别;或者物体的回波要高于同时收到的来自地面的背景回波(称为地面杂波)。

而被识别。在有些情况下,地面杂波比噪声要大得多。如图 1.13 所示,当远方的目标接近雷达时,其回波的强度迅速增加。但只有当回波信号从背景噪声和(或)地面杂波中显现时,回波信号才能被检测到。

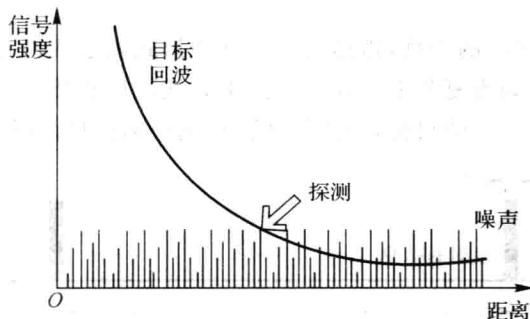


图 1.13 目标回波检测过程

(4)方向性。一副天线把辐射的能量集中在某一方向上的程度通常称为方向性。方向性几乎是每一部机载雷达的关键特征,它除了能决定雷达对目标的测角能力外,还对处理地面杂波的能力有十分重大的影响。

(5)辐射能量在角度上的分布。人们可能会简单地认为,一副雷达天线能把所有发射出去的能量都集中到一个窄波束中,在这个波束中功率又是均匀分布的。人们还可能认为,如果把一个锥形波束像探照灯一样指向空中的一个假想的屏上,它就会以均匀的强度照亮一个圆形区域。虽然这是人们所希望的,但是天线能实现的程度比探照灯要差。

像所有天线一样,一副笔形(锥形)波束天线几乎在每个方向上都要辐射一些能量,如图 1.14 所示,大部分能量都集中在围绕天线的中心轴或轴线的一个大致为锥形的区域内,这个区域称为主瓣。如果通过这个瓣的中央轴把图形切成两半,就会发现主瓣的侧面有一系列的弱瓣,称为副瓣。

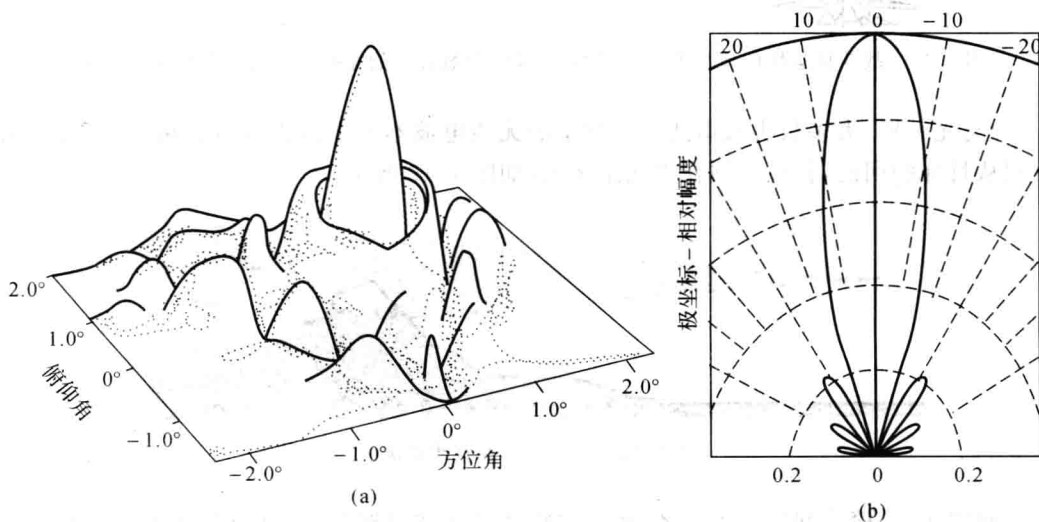


图 1.14 辐射能量分布

(6)波束宽度。主瓣的宽度称为波束宽度,它是波束相对的边缘之间的角度。波束通常不是对称的,因此通常要区分方位波束宽度和垂直波束宽度。

随着偏离波束中心角度的增加,主瓣值越来越低,为了使波束宽度的任何值都有意义,必须规定什么是波束的边缘。

从雷达工作的角度看,波束边缘可定义为功率下降到波束中央功率某任意选定的分数值的点。最常用的分数值是 $1/2$,用 dB(分贝)表示; $1/2$ 分数值对应的分贝数为 -3 dB,即波束宽度通常是在功率降到最大值一半(-3 dB)的点之间测量的。 3 dB 波束宽度(θ_{3dB}),大致上是零至零之间的波束宽度 θ 的一半。因此,在这些点之间测出的波束宽度称为 3 dB 宽度,波束边缘示意图如图 1.15 所示。

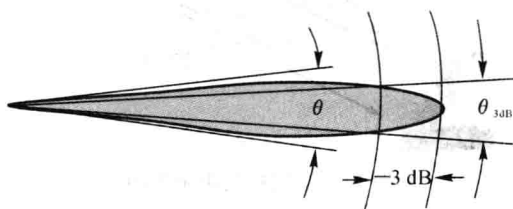


图 1.15 波束边缘示意图

1.1.4 探测目标

目标回波的强度与目标距雷达距离的四次方成反比,因此,当远方的目标接近雷达时,其回波的强度将迅速增强。回波信号增强到足可被检测的距离取决于诸多因素,其中最重要的因素有以下几个:

- 1)发射波的功率;
- 2)时间比: t/T ,其中 t 为在周期 T 中的发射时间;
- 3)天线的尺寸;
- 4)目标的反射特性;
- 5)在每个扫描周期中,目标位于天线波束内的时间;
- 6)目标出现在扫描中的次数;
- 7)无线电波的波长;
- 8)背景噪声与杂波的强度。

与高速公路远处从一辆卡车反射回的闪烁并衰减的太阳光很相像,在雷达方向上散射的回波强度也或多或少地随机变化着。由于回波信号这一特性以及背景噪声的随机性,某给定目标能被雷达探测的距离不是固定不变的。然而,在任何特定距离上目标可被探测的概率(或目标到达某给定距离的时间)可以被准确地预测出来。

通过对上述参数中可控部分的优化,可以将雷达做得足够小,使其能安装在战斗机的前端,同时可探测到上百千米外的小目标。安装在大型飞行器上的雷达可探测的距离更远。

1.1.5 测定目标位置

在许多应用中,仅仅知道目标的存在是不够的,还需要知道目标的位置,即目标的距离(范

围)和方位(角度)。

(1)测距。通过测量无线电波从到达目标再从目标返回所经历的时间就可测定距离。无线电波的传播速度本质上是恒定的,就是光速。因此,目标的距离就是无线电波往返传输时间的一半乘以光速,即目标距离 $=\frac{1}{2}\times$ 往返时间 \times 光速。雷达测距示意图如图 1.16 所示。

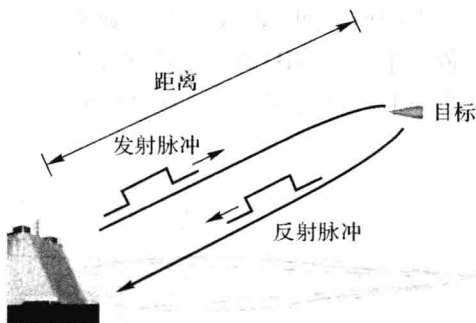


图 1.16 雷达测距示意图

(2)测角。在雷达技术中,角位置的测量是利用天线的方向性来实现的。雷达天线将电磁能量汇集在窄波束内,当天线波束轴对准目标时,回波信号最强。根据接收回波最强时的天线波束指向,就可以确定目标方向。雷达测角示意图如图 1.17 所示。

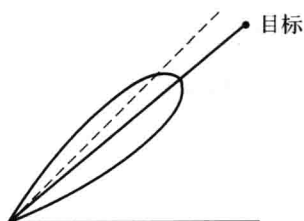


图 1.17 雷达测角示意图



图 1.18 多普勒频移的例子

(3)测速。生活中经常会遇到这种情况,当疾驰的车辆向我们驶来时,车辆产生的噪声非常刺耳,而当它驶过我们离我们远去时,噪声变得低沉很多,这就是多普勒效应,也称多普勒频移(见图 1.18)。

多普勒频移:当目标物与雷达之间存在相对运动时,接收到回波信号的载波频率相对于原来发射的载波频率产生一个频率偏移,这个频率偏移在物理学上称之为多普勒频移。

同样在雷达测距时,如果雷达和目标之间存在相对运动,那么雷达波也会产生多普勒频移。它的数值为

$$f_d = -\frac{2\dot{R}}{\lambda} \quad (1.1.1)$$

式中, f_d 为多普勒频移,也称多普勒频率; \dot{R} 为雷达和目标之间距离变化率; λ 为发射雷达波的波长。

因此,雷达只要能够检测回波信号的多普勒频移,就可以确定目标和雷达之间的相对速度。

1.1.6 机载火控雷达

机载火控雷达作为航空综合火控系统的目标探测子系统,它的主要任务是在各种条件下,在其作用范围内,探测和跟踪空中或地面(海面)目标,测定目标参数。它一般具有多种工作状态。

(1) 空-空状态。空-空作战时,雷达具有上视/下视搜索功能,自动或手动截获目标,进行单目标跟踪或多目标边扫边跟的功能。空战格斗时,雷达具有以目标瞄准线定轴或最佳扫描、垂直扫描、可偏移扫描等方式探测目标,自动截获后进入跟踪,并将目标参数送入火控计算机进行火控计算,引导导弹和机炮攻击目标等功能。

(2) 空-面状态。空-面状态是为战斗机有效搜索和攻击海上或地面目标而设计的。为了获得良好的空-面能力,火控雷达通常应该具有以下几种能力:① 空-地测距能力;② 真波束地图测绘能力;③ 对海搜索能力;④ 地面动目标检测和跟踪能力。

(3) 辅助导航状态。为了使飞机能掠地飞行,避开敌方的探测和攻击,雷达具有地形跟随、地形回避和等高线测绘3种辅助导航功能。

(4) 电子反干扰状态。由于恶劣的电子环境及电子战要求,所以机载火控雷达必须具有专门的电子反干扰措施,例如能抑制同频异步脉冲干扰、距离欺骗干扰、角度欺骗干扰等。

(5) 敌我识别功能。IFF(敌我识别)系统发出询问脉冲,友机上的应答机用编码回答。

(6) 制导功能。当制导半主动寻的导弹时,机载火控雷达必须加一部连续波照射器。

1.1.7 机载雷达战技指标

雷达的战术参数是雷达完成作战战术任务所具备的功能和性能。雷达的技术参数是描述雷达技术性能的量化指标。雷达的战术参数是设计雷达的依据,反之,雷达的技术参数决定了雷达的战术性能。

1. 雷达战术指标

(1) 探测空域。探测空域是雷达能以一定的检测概率和虚警概率、一定的目标起伏模型和一定的目标雷达截面积进行探测的空间区域,是由雷达的最大探测距离、最小探测距离、方位与俯仰扫描角所构成的空间。

(2) 目标参数测量。目标参数测量包括距离、方位、高度、速度、批次、机型和敌我识别等。

(3) 分辨率。雷达的分辨率是指雷达能分辨空间两个目标靠近的能力,包括速度分辨率、距离分辨率与角度分辨率。

1) 速度分辨率。速度分辨率是指能够区分同一目标不同运动速度的最小速度间隔,即

$$\Delta f_d = 2\Delta v / \lambda$$

2) 距离分辨率。距离分辨率是指同一方向(角度)上能够区分两个目标的最小距离,即

$$\Delta R = c\tau / 2$$

式中, τ 为雷达发射脉冲宽度。

3) 角度分辨率。角度分辨率是指在同一距离上能够区分两个目标的最小角度 $\Delta\theta$, $\Delta\theta$ 为雷达天线半功率点波束角。

(4) 目标参数测量精度。目标参数测量精度是指雷达测量目标坐标参数的误差,通常用

均方根值来表示。它主要由以下参数组成： $\sigma_{\text{速度}}$ 、 $\sigma_{\text{方位}}$ 、 $\sigma_{\text{俯仰}}$ 、 $\sigma_{\text{距离}}$ 。

(5) 目标参数录取能力。目标参数录取能力是指雷达完成一次全空域探测后，能够录取多少批目标参数的能力。

(6) 雷达抗干扰能力。雷达抗干扰能力是指雷达在电子战环境中采取各种对抗措施后，雷达生存或自卫距离改善的能力。抗干扰措施包括波形设计、空间对抗、极化对抗、频域对抗、杂波抑制和战术配合等。

(7) 可靠性、可维护性。

(8) 体积、质量、功耗。

(9) 工作环境、机动性。

2. 雷达技术指标

(1) 雷达工作频率。雷达工作频率 f_0 与波长 λ 之间的关系为 $f_0 = c/\lambda$ 。

(2) 雷达发射脉冲功率。雷达发射脉冲功率 P_t 与平均功率 P_{av} 、脉冲重复周期 (PRT) T_r 以及脉冲宽度 τ 之间的关系为 $P_t = (T_r P_{av})/\tau$ 。

(3) 脉冲信号参数。脉冲信号参数包括发射脉冲宽度 τ 、PRT T_r 、PRF f_r 。雷达的最大模糊距离为 $R_{\max} = 0.8 T_r c/2$ 。

(4) 雷达天线参数。雷达天线参数包括天线形式 (线、面、平板隙缝、阵列等)、反射 (阵) 面尺寸、天线增益、第一幅瓣电平、波束形状、主波束宽度、扫描方式、扫描周期等。

(5) 接收机灵敏度。接收机灵敏度是指雷达以一定检测概率和虚警概率所能探测到目标的最小回波信号功率。

(6) 雷达抗干扰技术。雷达抗干扰技术是指应用于雷达的抵抗外部环境干扰的技术。

(7) 目标参数录取方式和能力。

(8) 雷达显示能力。雷达显示能力包括探测到的各个技术参数与二次产品的显示能力。

(9) 系统设计技术。系统设计技术包括模块化、标准化、系列化。

(10) 故障检测能力、维护能力。

(11) 功耗、工作环境适应能。

1.2 雷达的基本原理

1.2.1 无线电波的本质与特性

1. 无线电波的本质

(1) 无线电波可以设想为发射到空中的能量。这种能量部分以电场形式存在，部分以磁场形式存在。因此，无线电波又称为电磁波。

电场和磁场是相互关联，彼此难分的。必须有电场才会有电流，而无论何时电流的流动，都会产生磁场。

如果这些场随时间而变化，其相互间的关系就得到了进一步的延伸。磁场的任何变化，无论幅度被增强或减弱，或对观察者的相对移动，都会产生电场。同样，电场的任何变化都会产生磁场 (见图 1.19)。

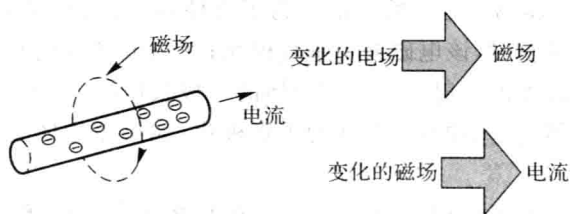


图 1.19 磁场和电场之间的关系

(2) 电磁辐射。电场与磁场之间的动态关系,即变化的电场产生磁场,变化的磁场产生电场,从而产生电磁波。由于这种变化关系,当带电粒子,比如电子,在运动方向或运动速度上发生变化,即产生加速度时,周围场也因此产生变化,即电磁波的能量就被辐射(见图 1.20)。电荷粒子运动的变化会引起由该粒子运动产生的周围磁场的变化。该变化会产生稍远处电场的改变,反过来又产生稍远处磁场的变化,这样的变化就会不断地推进。

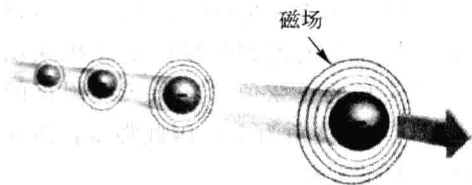


图 1.20 带电粒子的电磁场

(3) 辐射源是无穷无尽的。由于有热扰动,所以所有物质中的电子都处于不停的随机运动中,因此,周围的每件物体都辐射电磁能量。大部分能量呈热辐射形式,但总有很小一部分能量呈无线电波的形式。热辐射、光辐射和无线电辐射其实是一回事,即电磁辐射,它们的区别就在波长上。

与自然辐射形成对照的是,雷达所发射的波是用强电流激励调谐电路产生的。因此,产生的波具有相同的波长,包含的能量要远远大于相同波长的自然辐射的能量。

2. 无线电波的特性

无线电波具有如下几个基本特性:速度、方向、极化、强度、波长、频率和相位。

(1) 速度。在真空中,无线电波以恒定的速度传播,即光速,用字母 c 表示。在对流层中,无线电波传播得略慢一些。另外,传播速度不仅因大气组成的不同而略微变化,还会因大气的温度与压强不同而略微变化。但是这些变化及其微小,大多数情况下可认为无线电波是以恒定的速度传播的,速度与在真空中一样,即 3×10^8 m/s。

(2) 方向。方向是波的传播方向,称为传播方向。波的传播方向既垂直于电场的方向又垂直于磁场的方向,这些方向(电场和磁场)总是离开辐射源向外传播的(见图 1.21)。

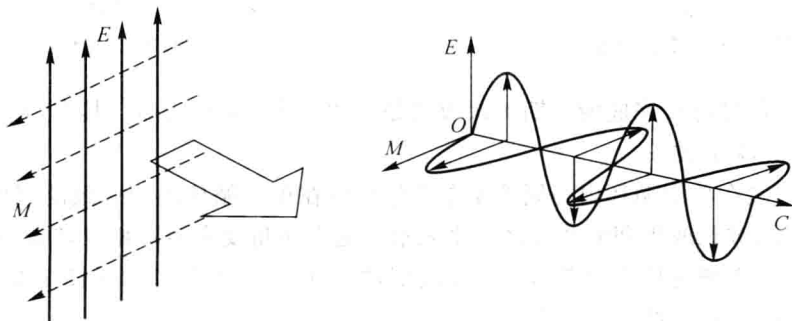


图 1.21 电磁场的方向